

文章编号 1004-924X(2017)01-0008-07

磁流变抛光系统去除函数的原点位置标定

郑立功^{1,2}, 李龙响^{1,2*}, 王孝坤^{1,2}, 薛栋林^{1,2}, 张学军^{1,2}

- (1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院 光学系统先进制造技术重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:为了实现磁流变抛光的确定性加工,对磁流变抛光去除函数的原点位置进行了标定。分析了磁流变抛光去除函数的产生过程及其去除率分布。利用标准圆柱,建立了抛光轮最低点与数控加工中心测头的相对位置坐标变换关系,实现了光学元件在机床坐标系中的精确对准。通过在光学元件的特征点上去除函数实验测试,实现了抛光轮最低点对应的去除函数原点位置标定,对标定误差进行了分析。选择圆形平面光学元件,应用以金刚石颗粒为抛光粉的水基磁流液,对抛光轮直径为 360 mm 的磁流变抛光系统进行去除函数原点标定,单次标定精度达到 0.030 mm。实验结果表明:本文提出的去除函数原点标定方法简单可靠,能够满足磁流变抛光技术的修形需求,可为磁流变抛光在光学制造中的应用提供有力支持。

关键词:光学制造;磁流变抛光;去除函数;原点标定

中图分类号:TH161 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20172501.0008

Coordinate-origin calibration of removal function in Magnetorheological Finishing

ZHENG Li-gong^{1,2}, LI Long-xiang^{1,2*}, WANG Xiao-kun^{1,2}, XUE Dong-lin^{1,2}, ZHANG Xue-jun^{1,2}

- (1. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;*
 2. *Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)*
- * *Corresponding author, E-mail:lellxhit@126.com*

Abstract: In order to realize determined fabrication by the Magnetorheological Finishing(MRF), the coordinate origin of removal function was calibrated according to the lowest point of polishing wheel. The generation of removal function and the distribution of removing rate were analyzed. Then the coordinate relationship between the lowest point of polishing wheel and the testing probe was deduced by using a standard cylinder, realizing the precise alignment of optical elements. The removal function was tested on special points of the optics, and the coordinate origin of the removal function derived from the lowest point of the polishing pad was calibrated. Furthermore the calibrating error was analyzed clearly. The calibration experiment was performed on the polishing wheel with a diameter of 360 mm, where a circle plane mirror was fabricated with aqueous magnetorheological fluid made of

收稿日期:2016-09-12;修订日期:2016-10-17.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61036015)

diamond polishing powder. The precision of calibration is up to 0.030 mm. The result indicates that the proposed calibration method is simple and reliable, therefore can meet the demands of the MRF and establish a strong foundation for MRF in optical fabrications.

Key words: optical fabrication; Magnetorheological Finishing(MRF); removal function; coordinate-origin calibration

1 引言

磁流变抛光(Magnetorheological Finishing, MRF)是近年来发展起来的一种先进光学制造技术,具有去除函数稳定、边缘效应可控、下表面破坏层小、无复印效应、修形能力强及加工精度高等诸多优点^[1-7]。因此,MRF 在高精度光学加工中得到了广泛的关注。

MRF 继承了计算机控制表面成形(Computer Control Optical Surfacing, CCOS)的基本思想,即磨头按设计好的轨迹和驻留时间以及去除函数在镜面上进行扫描,以达到修正面形误差的目的。在 CCOS 修形的过程中,去除函数理论上是对称分布的,一般直接定义去除函数的圆对称作用区域中心点为去除函数的原点,这一原点也对应着磨头的几何中心或者转动主轴位置,在此基础上可以实现光学元件坐标系和机床坐标系的对准,进而完成光学元件的加工。但是 MRF 的去除函数有别于 CCOS 和离子束抛光(Ion Beam Figuring, IBF)等圆对称的去除函数^[8-11],它呈 D 字形分布或者“子弹头”形分布,不存在理论上的几何中心,因此无法直接确定 MRF 去除函数的原点位置。由于去除函数原点位置是工件坐标系与机床坐标系对准的基础,因此去除函数原点位置的确定成为制约 MRF 确定性加工的因素之一。目前,鲜有此方面的研究报道。

本文提出了一种精确标定 MRF 去除函数原点位置的方法。设计了空心的标准圆柱,根据标准圆柱、机床测头、磁场工作区域抛光轮最低点以及光学元件之间的位置关系,通过去除函数实验确定了抛光轮最低点所对应的去除函数作用区域中的特征点,进而建立了以此特征点为去除函数原点位置的去除函数坐标系,完成了 MRF 去除函数原点的标定。

2 磁流变抛光去除函数

MRF 的去除函数定义为单位时间内磨头驻留在某一固定点时材料的去除量分布。如图 1 所示,在有效作用区域磁场的的作用下,附着在以角速度 ω 转动的抛光轮上的磁流变液形成具有一定硬度的“缎带”凸起。当抛光轮靠近被加工元件,被压入一定深度的“缎带”凸起会对材料进行一定量的去除,进而形成去除函数^[12-13]。

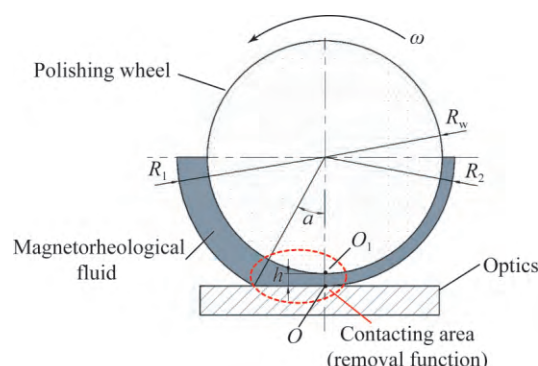


图 1 磁流变抛光去除函数的产生过程

Fig. 1 Generation of removal function of MRF

MRF 典型去除函数的去除率分布如图 2 所示,作用区域呈现 D 字形,去除率沿着 oa 方向轴对称分布,沿着 ob 方向明显的不对称。

在实际子孔径的光学加工过程中,一般选择磨头上的特征点与去除函数上的某一点对应,进而实现磨头与被加工光学元件的对准。磁流变抛光时,选择磁场有效作用区域的对称中心,即在图 1 中选择抛光轮表面上的最低点 O_1 为特征点,考虑一定的抛光间隙 h (抛光轮表面的最低点 O_1 与被加工镜面之间的距离), O_1 对应于去除函数作用区域中的 O 点。对于图 2(a) 中所示实际得到的非圆对称去除函数,不能直接确定 O 点在 D 字形中的位置,因此需要对 O 的位置进行合理标定。本文直接定义 O_1 所对应的 O 点就是 D 字形去除函数的原点。

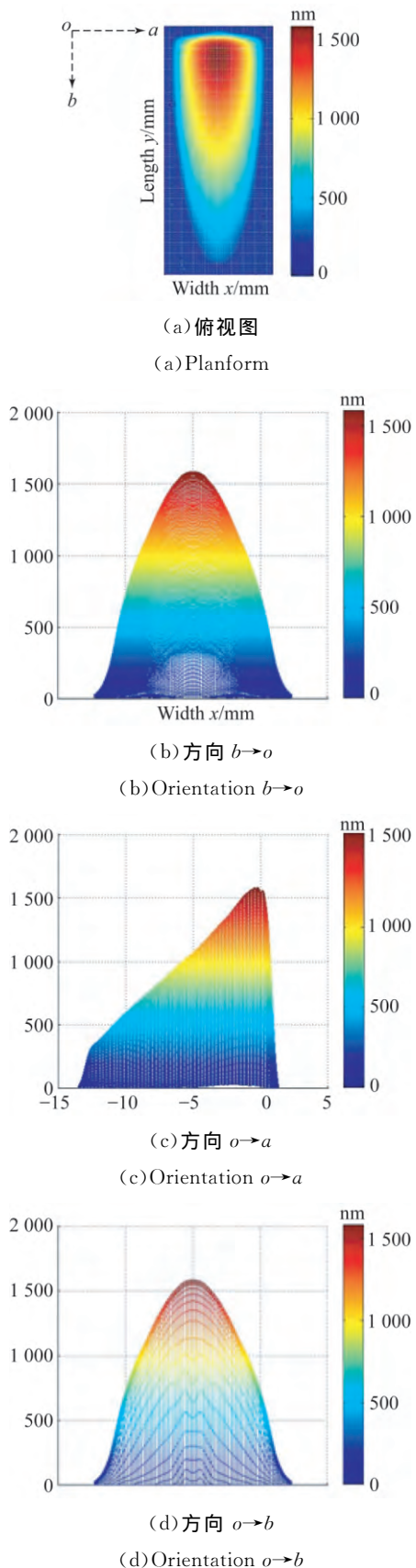


图 2 MRF 去除函数的材料去除率

Fig. 2 Distribution of removing rate of removal function in MRF

3 机床测头与抛光轮表面最低点对准

在磁流变抛光结构中,抛光轮实际上是一个球面,因此抛光轮表面上某一特征点位置的精确测量成为一个挑战。选择图 1 中的 O_1 点(即抛光轮表面上的最低点)为特征点,本节通过一个高精度空心圆柱为桥梁,建立起机床测头和抛光轮最低点之间的相对坐标关系。

3.1 空心圆柱固定

图 3 所示是一个空心圆柱。该圆柱且有较高的内表面圆柱度、上下表面平面度和平行度以及母线与底面的垂直度,并通过卡具固定在数控中心转台上。圆柱的母线与机床坐标系的 xy 面垂直,圆柱内表面半径为 R_1 ,外表面半径为 R_2 ,高度为 H 。

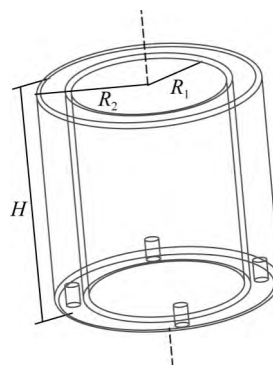


图 3 标准圆柱

Fig. 3 Standard cylinder

3.2 抛光轮最低点与圆柱对准

在水平方向和竖直方向不断地移动抛光轮,辅助塞尺工具,使得抛光轮的球表面与空心圆柱的上表面圆环吻合。此时,抛光轮的最低点和抛光轮球心的连线与空心圆柱的中心线对齐,如图 4 所示,数控机床的绝对坐标值为 (X_m, Y_m) 。将抛光轮最低点与圆柱上底面接触,机床 Z 方向绝对坐标值为 Z_m 。由此得到抛光轮最低点与标准空心圆柱对准时,机床的绝对坐标值表示为 (X_m, Y_m, Z_m) 。

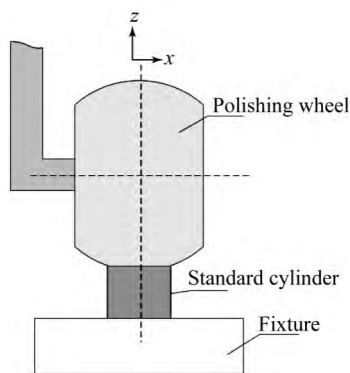


图 4 标准圆柱标定方案示意图

Fig. 4 Calibrating scheme with standard cylinder

3.3 机床测头与圆柱对准

利用磁流变数控加工中心上的接触式测头,通过寻边定位功能测量标准空心圆柱内表面,计算出测头在圆柱中心线位置时机床的绝对坐标 (X_t, Y_t) 。另外,使用数控中心的测头测量圆柱上底面的机床坐标 Z_t ,由此得到测头与标准空心圆柱对准时机床的绝对坐标 (X_t, Y_t, Z_t) 。

3.4 坐标变换关系

MRF 的去除函数测试和标定一般选择平面光学元件,因此在不考虑曲面的情况下,对于平面上任意一点,测头测量此点时机床的绝对坐标与抛光轮位于此点处机床的绝对坐标存在如下坐标变换关系:

$$\begin{cases} X_0 = X_{0t} - (X_t - X_m) \\ Y_0 = Y_{0t} - (Y_t - Y_m) \\ Z_0 = Z_{0t} - (Z_t - Z_m) \end{cases}, \quad (1)$$

其中: (X_{0t}, Y_{0t}, Z_{0t}) 是机床测头测量平面元件上某一点时的机床坐标值, (X_0, Y_0, Z_0) 是抛光轮最低点与平面光学元件上此点重合时的机床坐标值。

MRF 间隙为 h ,则测头测量时机床坐标和图 1 中 O 点的机床坐标关系为:

$$\begin{cases} X_0 = X_{0t} - (X_t - X_m) \\ Y_0 = Y_{0t} - (Y_t - Y_m) \\ Z_0 = Z_{0t} - (Z_t - Z_m) - h \end{cases}. \quad (2)$$

4 去除函数原点标定

4.1 去除函数测试

为了提高标定精度,这里选择具有较高几何尺寸精度和面形精度的平面光学元件作为加工对象。将光学元件固定在机床上,选择光学元件上

具有一定几何特征的特定位置,利用第 3 节的对准方法,使用机床测头对该特定位置进行位置测量。设定抛光间隙,根据式(2)的坐标变换关系,将抛光轮移动至该特定位置进行去除函数测试。

利用干涉仪检测测试后的去除函数,标定干涉仪采集得到数据像素分辨率(单个像素代表的实际物理尺寸)。在干涉仪得到的数据分布图中,利用光学元件的几何特征,确定已经选择的特定位置在干涉仪数据分布图中的位置,同时特征点也存在于干涉数据图中的实测去除函数作用区域里。由第 3 节可知,实际测试去除函数时,已经选择的特定位置与图 1 中 O_1 对应的 O 点位置重合。因此,在干涉数据图中,特征点在去除函数作用区域中的位置就是本文定义的去除函数原点位置。利用数据像素分辨率可以计算出原点位置与去除函数 D 字型作用区域的相对关系。

在这一过程中光学元件上的特定位置应该适当选取,比如圆形光学元件的几何中心。当干涉仪能够检测圆形光学元件的全口径时,可以较容易确定几何中心在干涉仪数据分布图上的位置。

4.2 标定精度分析

标定误差如下:(1)抛光轮最低点标定时,标准空心圆柱和抛光轮吻合度带来的误差 ω_1 ;(2)标准圆柱内表面的制造精度 ω_2 与圆柱接触的抛光轮上的圆度 ω_3 ;(3)测头对标准圆柱进行测量时误差取决于测头精度 ω_4 ;(4)测试去除函数后,特征点的位置精度取决于光学元件的几何尺寸误差 ω_5 ,以及干涉仪数据分布中像素的分辨率精度 ω_6 ;(5)机床定位精度 ω_7 。其他误差与标定过程无关,可以忽略。根据误差传递原理,传递系数均为 1,总误差为:

$$\omega_t = \sqrt{\sum_{i=1}^7 \omega_i^2}. \quad (3)$$

各个误差均为随机误差,可以采取多次标定的方法进一步提高标定精度,降低 ω_t 的值。

5 标定实验

5.1 原点位置标定

本文针对自研口径为 360 mm 的永磁型 MRF 系统 MRF360,进行了去除函数原点位置的标定。它被集成到具备 2.5 m 大口径非球面加工能力的龙门式五轴联动数控中心上,如图 5 所示。

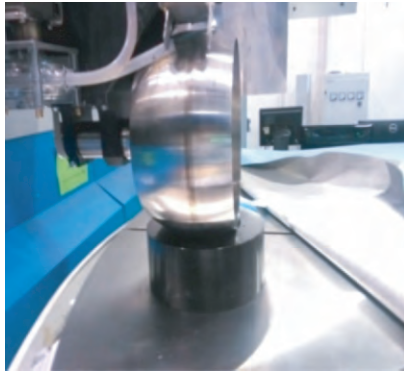


图 5 MRF360 抛光轮最低点与圆柱对准

Fig. 5 Alignment of lowest point of polishing pad to cylinder

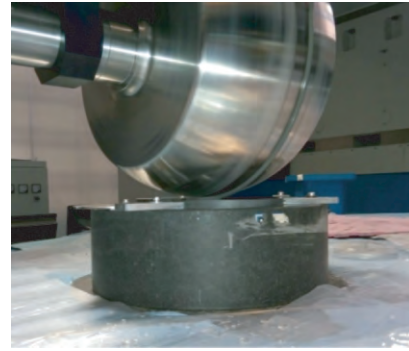
将圆柱固定, 抛光轮不断降低, 同时在水平方向上移动抛光轮位置, 使用 0.01 mm 的塞尺确定抛光轮是否与空心圆柱完全吻合, 抛光轮最低点与标准空心圆柱对准时机床坐标 (X_m, Y_m, Z_m) 为 $(844.578, -200.324, 193.440)$; 测头与标准空心圆柱对准时机床的绝对坐标 (X_t, Y_t, Z_t) 为 $(305.740, 318.196, 239.554)$; 抛光间隙 h 选取 2.0 mm, 则测头测量坐标和图 1 中 O 点的坐标关系为:

$$\begin{cases} X_0 = X_{ot} + 538.838 \\ Y_0 = Y_{ot} - 518.520 \\ Z_0 = Z_{ot} - 44.114 \end{cases} \quad (4)$$

在口径为 150 mm 的圆形平面光学元件上进行去除函数测试。利用机床测头的定位寻边功能找到圆形平面元件几何中心的机床坐标 $(603.203, 0.324, 256.106)$, 并将此几何中心作为去除函数原点标定时光学元件上的特征点。当抛光轮最低点移动到此点进行去除函数测试时, 机床坐标为 $(1142.041, -518.196, 209.992)$ 。

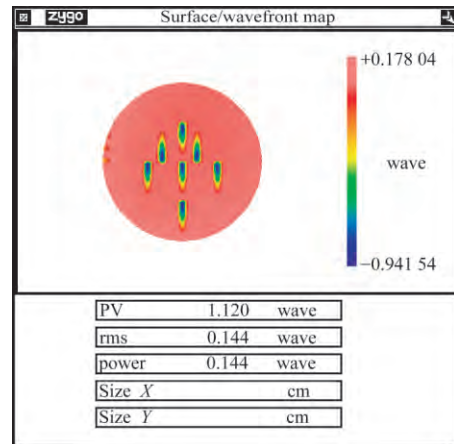
去除函数测试的相关参数为: SiC 基底涂 Si 改性层材料, 抛光轮边缘线速度 1 m/s, 自研磁流变液的抛光粉为金刚石微粉, 磁流变液温度控制在 20 °C, 实验室温度 23 °C。

去除函数实际测试过程如图 6(a) 所示, 利用 Zygo 干涉仪对平面光学元件进行全口径测量。去除函数测试结果如图 6(b) 所示。在检测到的数据分布图上找到圆形光学元件的圆心, 如图 6(c) 中 O' 所示, O' 在去除函数 D 字形作用区域中的位置就是去除函数原点 O , O 以相差抛光间隙 h 的距离对应着抛光轮的最低点 O_1 。



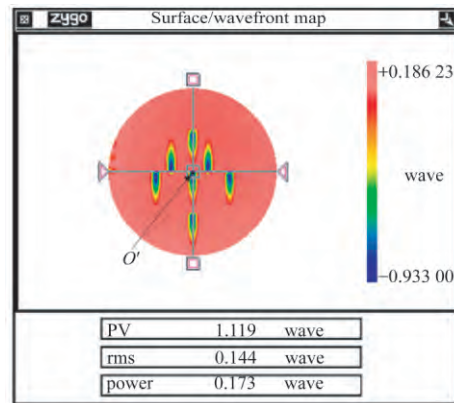
(a) 去除函数测试

(a) Experimental test of removal function



(b) 去除函数测试结果

(b) Result of removal function testing



(c) 圆形光学元件的几何中心

(c) Geometric center of circle optics

图 6 圆形光学元件上的去除函数测试

Fig. 6 Experimental test of removal function on circle plane optics

如图 7 所示, 以 O 为原点, 以“子弹头”的方向为 y 轴, 建立 MRF 去除函数坐标系可以看出与抛光轮最低点对应的去除函数原点处在去除率对称分布的对称轴上。由于抛光轮的线速度沿着

图 7(a)的 y 方向, O 点在对称轴的位置是可以预知的。在去除率非对称分布的方向上, O 点位于去除函数上去除率急剧变化的一侧,靠近去除率的峰值位置,但不在峰值位置。对于这一点,本文不做讨论,在以后的文章中将结合理论模型进行分析。

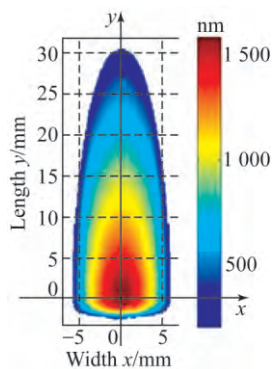
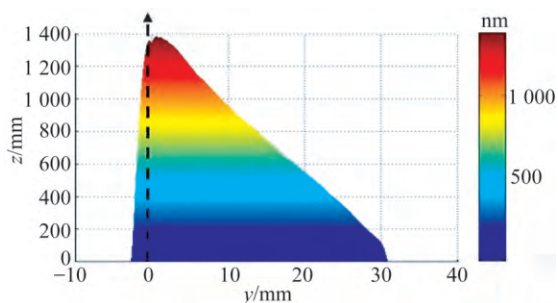
(a) x - y 方向(a) x - y axis(b) y - z 方向(b) y - z axis

图 7 去除函数原点标定结果

Fig. 7 Calibration result of coordinate origin of MRF's removal function

5.2 标定精度分析

标准圆柱的内半径 R_1 为 60 mm,外半径 R_2 为 100 mm,制造精度公差等级为 6 级。MRF360 系统去除函数标定过程中的误差源分析结果如表 1 所示,单次标定总误差为 0.03 mm。对于

参考文献:

- [1] HARRIS D C. History of magnetorheological finishing [J]. *SPIE*, 2011,8016: 1-22.
- [2] JACOBS S D, GOLINI D, HSU Y, et al.. Magneto-rheological finishing: a deterministic process for optics manufacturing [J]. *SPIE*, 1995,2576: 372-382.

MRF360 的去除函数约为 $13 \text{ mm} \times 32 \text{ mm}$,原点标定精度满足工程需求。从各个误差性质可以看出,每个误差都是随机误差,可以采取多次标定法进一步提高标定精度,降低 ω_i 的值。

表 1 去除函数原点标定误差

Tab. 1 Calibration errors of coordinate origin of MRF's removal function (μm)

误差	数值
ω_1	≤ 10
ω_2	≤ 10
ω_3	≤ 20
ω_4	≤ 2
ω_5	≤ 10
ω_6	≤ 10
ω_7	≤ 10
ω_8	≤ 30.06

6 结 论

本文提出了一种对 MRF 系统去除函数原点位置进行精确标定的方法。首先建立了抛光轮最低点与数控加工中心测头的相对位置关系,实现了对光学元件的对准。在磁流变定点抛光实验测试的基础上,标定出了抛光轮最低点对应的去除函数原点位置,同时对标定误差进行了分析。选择 $\phi 150 \text{ mm}$ 的圆形平面光学元件,对抛光轮口径为 360 mm 的 MRF 系统的去除函数完成了原点标定,单次标定精度达到 0.03 mm,多次标定可以有效提高标定精度。本文提出的方法能够实现磁流变抛光去除函数原点位置的高精度标定,同时适用于其他轮式光学加工中去除函数的原点标定。通过引入激光跟踪仪等空间坐标测量设备此外,可以进一步提高原点位置的标定精度。

- [3] 李圣怡,彭小强. 光学零件可控柔体制造的理论基础与方法[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(17): 1-9. LI SH Y, PENG X Q. Basic theory and method of controllable compliant tools for optic elements manufacturing [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(17): 1-9. (in Chinese)
- [4] SHOREY A B, JACOBS S D, KORDONSKI W I, et

- al. . Experiments and observations regarding the mechanisms of glass removal in magnetorheological finishing [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(1): 20-33.
- [5] 李龙响, 郑立功, 邓伟杰, 等. 应用四轴联动磁流变机床加工曲面 [J]. *光学 精密工程*, 2015, 23(10): 2819-2826.
LI L X, ZHENG L G, DENG W J, *et al.*. Magnetorheological finishing for curve surface based on 4-axis machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10): 2819-2826. (in Chinese)
- [6] HU H, DAI Y F, PENG X Q, *et al.*. Research on reducing the edge effect in magnetorheological finishing [J]. *Applied Optics*, 2011, 50(9): 1220-1226.
- [7] CHENG H B, FENG Z J, WANG Y W. Surface roughness and material-removal rate with magnetorheological finishing without subsurface damage of the surface [J]. *Journal of Optical Technology*, 2005, 72(11): 865-871.
- [8] JONES R A, RUPP W J. Rapid optical fabrication with computer-controlled optical surfacing [J]. *Optical Engineering*, 1991, 30(12): 1962-1968.
- [9] JONES R A. Fabrication of off-axis optical segments [J]. *SPIE*, 1992, 1752: 73-82.
- [10] ALLEN L N, KEIM R E, LEWIS T S, *et al.*. Surface error correction of a Keck 10 m telescope primary mirror segment by ion figuring [J]. *SPIE*, 1991, 1531: 195-200.
- [11] 吴庆堂, 聂凤明, 王大森, 等. 影响方形非球面光学元件加工精度的工艺研究 [J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0316001.
WU Q T, NIE F M, WANG D S, *et al.*. Research on technology of influence square aspheric optical element processing accuracy [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39(3): 0316001. (in Chinese)
- [12] SHOREY A B. *Mechanisms of Material Removal in Magnetorheological Finishing (MRF) of Glass* [D]. New York: University of Rochester, 2000.
- [13] CATRIN R, NEAUPORT J, TAROUX D, *et al.*. Magnetorheological finishing for removing surface and subsurface defects of fused silica optics [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(9): 092010.

作者简介:



郑立功(1969—),男,吉林长春人,博士,研究员,1992年于吉林工业大学获得学士学位,2003年于中科院长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事光学超精加工和检测技术的研究。E-mail: ligongz @ yahoo.com

通讯作者:



李龙响(1987—),男,安徽宿州人,博士,2011年于哈尔滨工业大学获得学士学位,2016年于中国科学院长春光学精密机械与物理研究所获博士学位,主要从事光学磁流变加工和检测方面的研究。E-mail: lellxhit @ 126.com